

doi: 10.3969/j.issn.1000-8349.2019.04.06

望远镜观测调度系统研究进展

李曼迪^{1,2}, 葛 亮¹, 姜晓军^{1,2}

(1. 中国科学院 光学天文重点实验室, 国家天文台, 北京 100012; 2. 中国科学院大学 天文与空间科学学院, 北京 100049)

摘要: 望远镜观测调度系统作为望远镜运行过程中的资源协调者, 主要用于对观测者的观测计划进行合理地安排调度, 使天文台各望远镜的观测资源得以充分利用。望远镜调度过程十分复杂, 而人工智能算法能够很好地解决此类问题。国内外相关团队也针对此问题进行了许多研究, 并在相应的望远镜上得到了应用实现。介绍了望远镜调度问题的解决方法, 总结了通用型望远镜常用的观测调度策略, 综述了观测调度系统在不同望远镜上的应用。随着人工智能的发展, 观测调度系统将有更大的发展空间, 并能够提高望远镜的观测效率与质量, 更好地服务于天文观测。

关 键 词: 天文望远镜; 观测调度; 人工智能

中图分类号: P111.2 **文献标识码:** A

1 引 言

天文学是一门基于观测的科学, 而望远镜作为天文学家探索宇宙的主要工具, 在天文观测中发挥重要作用^[1]。天文望远镜根据不同的特征具有不同的分类。根据望远镜所处位置划分, 天文望远镜分为空间望远镜和地基望远镜; 根据观测的波段划分, 天文望远镜可分为光学望远镜、红外望远镜、射电望远镜、高能射线望远镜等; 根据建设的科学目标划分, 天文望远镜又可分为专用型望远镜和通用型望远镜。不管是何种类型的望远镜, 在实际运行的过程中, 望远镜的观测调度都是不可或缺的一部分。

天文望远镜的观测调度是指将观测任务与观测资源(仪器、时间等)进行协调安排的过程。在实际观测中, 由于地球自转和公转造成天体视运动的变化, 使观测目标在各个时期具有不同的目标可见性。观测目标是否可见、是否能够获得较好的数据质量, 是观测者在进行任务安排时考虑的要点。合理的望远镜调度能够在确保数据质量的同时, 使望远镜的观测时间得以更为充分有效的利用, 提高望远镜的观测效率。然而, 由于望远镜建设目标、观测模

收稿日期: 2019-02-12; 修回日期: 2019-04-15

资助项目: 国家自然科学基金(U1831209)

通讯作者: 姜晓军, xjjiang@nao.cas.cn

式等各方面的差异,各个望远镜观测调度的形式与程度不尽相同。

目前,国内通用型光学望远镜主要采用传统的观测者到站观测模式(visitor mode, VM)。以兴隆观测站为例,科学委员会负责观测计划的收集、评定、时间分配等工作,一般以天为单位进行观测时间的分配。各观测者将在相应的观测时间前往兴隆观测站进行其课题的观测。在该模式下,望远镜观测调度的职责由科学委员会与相应的观测者承担,科学委员会根据观测者自身的观测意愿进行宏观的时间划分,而具体时间的利用则由相应的观测者进行安排。该观测模式虽然简单易行,但也存在一些不足:1) 观测时间利用率不高。一方面,由于经验、任务完成情况不同,可能造成观测时间的流失;另一方面,观测课题需求与观测环境条件不能实现高度匹配。2) 观测者需自行承担时间损失。观测者在其观测期间,如果遇到天气状况不能满足观测要求,或者仪器设备出现故障等情况,从而损失观测时间,并不会因此被重新分配观测时间。

除到站观测模式外,服务观测模式(service mode, SM)在国际通用型望远镜中也有较多使用,它是一种以提高望远镜科学效率为主要目标的观测模式^[2],其核心思想是通过减小时间分配粒度,在不同观测条件下根据特定观测者的要求获取天文数据,即根据天气状况(视宁度、云量、天光背景)等环境限制因素,选择满足观测要求的科学计划来作为观测任务执行^[3],其常用的调度模式有队列观测等。与传统观测模式相比,该模式下观测调度考虑的因素更多,除了观测计划中应进行观测的时间外,还考虑了环境等因素与观测计划的匹配,保证更高质量观测的进行。

随着计算机技术与自动化技术的发展,望远镜观测控制技术的发展主要经历了机械控制望远镜、电子控制望远镜、自动执行望远镜、系统级控制望远镜这几个阶段,并向着具备自主管理与决策功能的智能控制望远镜的未来发展^[4],这也对望远镜的观测调度提出了新的要求。望远镜调度系统是计算机控制望远镜实现程控甚至是自主控制的必要组成部分^[5],而望远镜智能化控制的最终目的是降低观测过程中的时间开销与人为操作失误,提高望远镜的观测效率与数据质量。因此,望远镜调度问题的研究是十分有意义的。

本文对望远镜观测调度系统的研究与应用进行了回顾、总结与展望。本文的内容结构安排如下:首先,从调度目标、约束条件与常用解算法对望远镜调度问题进行概述;其次,介绍了一些常用的望远镜调度策略以及典型的望远镜观测调度系统应用;最后,对望远镜观测调度系统的发展前景进行了展望。

2 望远镜调度问题概述

调度问题的研究起源于20世纪50年代^[6],经过几十年的发展,该研究在工业生产、电力、航空、运输、计算机等领域得到广泛的延伸,望远镜调度便是该问题在天文观测领域的应用。

为了获得合理高效的观测计划,望远镜调度问题通常被转化为约束优化问题进行处理,即选择一组决策变量,使目标函数取得最优值的问题,同时这组决策变量必须满足一定的约

束条件。约束优化问题通常可定义为如下形式^[7]:

$$\begin{cases} \min f(x) \\ \text{s.t. } g_j(x) \leq 0, j = 1, 2, 3, \dots, q \\ h_j(x) = 0, j = q + 1, \dots, m \end{cases} \quad (1)$$

其中, $x = [x_1, x_2, x_3, \dots, x_n] \in S$ 是决策变量, S 表示 n 维搜索空间, 且满足 $l_i \leq x_i \leq u_i, 1 \leq i \leq n$ 边界条件; $f(x)$ 是目标函数, q 表示不等式约束条件的个数, $m - q$ 表示等式约束的个数; $g_j(x)$ 为第 j 个不等式约束条件, 而 $h_j(x)$ 为第 $j - q$ 个等式约束条件。

通过上述定义, 望远镜调度问题可以视为在满足所有约束条件的前提下, 在变量的定义范围内, 寻找使目标函数 $f(x)$ 达到最优的解。

2.1 调度目标

望远镜调度的主要目标是尽可能提高观测时间的利用率, 提高望远镜的观测效率, 实现效益的最大化^[8]。在具体实施过程中, 不同望远镜的调度侧重点有所不同, 需根据实际情况将总体调度目标精细化, 以获得最佳调度结果。

加拿大-法国-夏威夷望远镜 (Canada-France-Hawaii Telescope, CFHT) 是一台具有高科技产出的望远镜, 其在队列观测模式下通过定义调度目标并生成观测队列的方法独具特色。CFHT 将进行观测的基本单元定义为观测块 (observation block, OB), 通常由单一目标源及其观测配置、限制条件等组成^[9]。望远镜调度的基本单元被称为观测组 (observation group, OG), 其具有恒定的时长, 该时长即为望远镜时间分配粒度的大小。在 CFHT 中, OG 的大小通常设定为 2 h。

CFHT 从队列容量、等级设置、目标压力、机构平衡以及人为因素五个方面对观测队列进行衡量选择^[10]。队列容量即为对当晚观测时间的使用率, 满足一定数值 (如设定队列容量需不小于 90%) 的队列才会进一步计算队列价值。每个 OG 价值由其相应的等级设置、目标压力以及机构平衡三项的评分之和决定, 人为因素可改变此三项的权重比例。而一个队列的队列价值则由此队列所有 OG 的平均价值决定, 如式 (2) 所示。观测队列的价值越高表明该队列的计划越适合进行观测, 即:

$$Queue_{value} = \sum(OG_{value}) / OG_{count} \quad (2)$$

在确定相应的调度目标后, 通过将调度问题数学抽象, 可以将其形式化表达为相应的目标函数, 以及若干不等式或等式约束条件, 以进行后续求解。

2.2 约束条件

在望远镜调度过程中, 约束条件是指某项科学计划在执行时的各项限制要求, 其一般分为可行性约束或偏好性约束两种类型^[11]。可行性约束是指在正常调度过程中一般不能被违反的约束条件, 通常也被称为硬约束, 它用来衡量一个调度方案的可行性。偏好性约束则是影响调度方案质量的约束条件, 可以尽可能地满足但并非必须具备, 也被称为软约束。

按照约束条件的来源可以将其主要归纳为以下五类^[11]。

(1) 本地约束: 指与本地台址情况相关的约束条件。由于观测目标的可见性和观测目标的天顶距等与各台址的自然地理位置有关, 因此将其定义为本地约束。

(2) 仪器设备约束: 由维修维护和终端更换等造成的具体设备运行情况, 以及不同设备自身的特点造成的调度差异性, 也是在调度时需要根据具体情况加以考虑的约束条件。

(3) 时间约束: 在具体调度的过程中, 每一天的可观测时间都是变化的, 需要根据具体的可观测时间段来制定当天的观测计划, 且需避免计划的过度和重复安排。

(4) 环境约束: 环境因素是调度过程比较复杂的约束条件, 由于其随时间变化, 所以调度过程中, 需要用较短的时间尺度对其进行判别衡量, 并进行决策。一般与观测者的科学计划比较相关的环境约束有视宁度、天光背景、大气透明度等。

(5) 优先级约束: 优先级一般是科学委员会给不同科学计划人为制定的等级顺序, 一般由其科学价值确定。在多国共建的望远镜中, 也会根据优先级来进行分配比例的调整^[9]。优先级的制定更有利于高质量项目的完成, 能够更高效地利用观测时间。

在众多约束条件中, 本地约束、时间约束、优先级约束和仪器设备约束为确定性约束, 其特点是约束条件提前可知且不易改变, 易于前期离线调度中的整体安排规划。而环境约束和部分临时维修工作造成的仪器设备约束则是动态约束, 虽然其容易随时间而动态变化, 但在相对较短的时间内是可预知的, 针对此约束还需通过在线动态调度进行解决^[12]。

作为约束优化问题, 约束条件的存在是望远镜调度问题复杂且难以求解的主要原因, 须采用一定的约束处理技术来对其进行处理, 最常见的约束优化方法有惩罚函数法和多目标法^[13]。惩罚函数法的主要思想是通过将约束违反度添加在目标函数惩罚项的方式, 将约束优化问题转化为无约束的单目标优化问题进行简化求解^[14]。多目标法则是将 n 个约束条件转化为一个或 n 个目标函数, 与原目标函数构成新的待优化向量进行求解^[13]。

2.3 常用算法

表 1 列出一些望远镜使用的调度算法。可以看到许多人工智能算法如进化算法 (evolutionary algorithm, EA)、禁忌搜索 (tabu search, TS)、模拟退火 (simulate anneal, SA)、蚁群算法 (ant colony optimization, ACO)、人工神经网络 (artificial neural network, ANN) 等都被用于望远镜调度问题的优化求解中 (其中, 哈勃望远镜使用的 SPIKE 调度系统, 其核心算法是 ANN)。人工智能算法能在可以接受的时间内, 求得最优化问题的近似最优解, 相比于求解过慢的传统算法, 此类算法在实际应用中具有较好的实用性。

表 1 不同望远镜所使用的调度算法总结^[15, 16]

望远镜	HST	VLT	Subaru	JWST	Gemini	Liverpool	STELLA	TJO-OAdM
算法	SPIKE	SPIKE	SPIKE	SPIKE	Disp	Disp	Disp	Disp
望远镜	SOFIA	GMRT	GBT	ALMA	RTS2	SKA	LOFAR	CTA
算法	SWO	LP	DP	EA, TS, SA	EA	EA	EA, SA	ACO

3 望远镜观测调度策略

望远镜观测调度策略是为实现既定科学目标, 指导望远镜如何开展观测的方法。详实有效的观测调度策略, 为观测过程中观测任务的有序进行提供保障。

在专用型望远镜如用于巡天项目望远镜的运行过程中, 为了能够在相对较短的时间内获取大量天体观测数据^[17]并确保数据质量, 相应的观测调度策略通常被制定。如在 SAGE (Stellar Abundance and Galactic Evolution) 巡天项目中, 观测前会提前对整晚观测天区和观测顺序整体规划, 一方面减少非曝光过程的时间消耗, 另一方面保证整晚观测的平均大气质量最小^[18]。合理的观测天区选择与执行顺序, 能够更好地调度望远镜进行观测, 避免观测时间的浪费。除此之外, 在暂现源巡天观测中, 如 Kiso 超新星巡天 (Kiso Supernova Survey, KISS) 项目, 也采用了后随观测策略。当巡天图像经过处理并发现爆发候选体时, 后随系统会自动触发并调度其他望远镜进行后随证认观测以及后续的光谱拍摄等^[19]。

在通用型望远镜的天文观测中, 观测调度策略为观测任务安排与执行提供准则。在经典的到站观测模式中, 此部分内容由观测者自行完成, 拥有不同经验的观测者对观测时间的利用不尽相同, 这也会对数据质量造成一定影响。而通过明确观测调度策略和制定详细规则, 使决策功能由观测者移交至控制系统, 则能更全面更科学地进行观测任务的安排, 这也是望远镜具备自主能力的基础。目前, 系统级控制望远镜在自动执行望远镜的基础上集成了环境监测、数据处理等功能, 使望远镜能够自动开启和关闭圆顶执行观测任务, 还能在恶劣天气下停止观测并保护设备^[20], 但其观测内容为事先准备的既定观测列表, 不能针对实际观测的动态情况做出观测调整, 缺乏一定的灵活性。为了更有效地利用观测时间, 需要采用智能化的调度系统, 而观测调度策略作为管理决策的依据, 也被更详细地讨论并制定。目前, 国内外团队也在望远镜观测调度领域做出诸多尝试, 常见的调度策略有多时标调度、动态调度、闭环调度等。

3.1 多时标调度策略

提高望远镜效率的观测调度的核心思想, 是利用精细化时间分配粒度来解决观测需求增长与有限的观测资源之间的矛盾。由于时间分配粒度的减小, 调度问题难以解决, 多时标调度策略得以采用。

多时标调度策略通过改变每次调度过程所考虑的时间尺度, 将观测计划具体化为 OG 或 OB 去进行多次调度, 一般调度过程可分为长期调度 (long-term scheduling, LTS) 和短期调度 (short-term scheduling, STS)。长期调度, 顾名思义, 对较长的一段观测时间进行观测目标的优化分配, 通常为一个观测季, 其主要考虑观测目标的确定性约束, 即本地约束、时间约束、优先级以及仪器设备的维护信息等。短期调度即在长期调度的基础上, 着重考虑动态约束信息, 对某一特定时间段, 如观测当晚, 根据预测天气信息等对已生成的观测计划进行观测目标的更新规划。

切连科夫望远镜阵列 (Cherenkov Telescope Array, CTA) 的观测调度系统采用多时标调度策略^[21], 具体如图 1 所示。观测季开始前, 该系统提前进行离线长期调度, 并对其调度

结果进行配置保存。每个观测夜晚，通过确认已进行与未进行的观测任务状态，得到长期调度当天需执行的任务列表，随后短期调度模块根据当天的天气等状态改变，对观测任务列表进行更新。多时标调度策略采用粗调度与细调度相结合的方式，通过不同的侧重点对观测任务进行有序安排，既能减少每次调度的工作量，又能获得较为精细的调度结果。

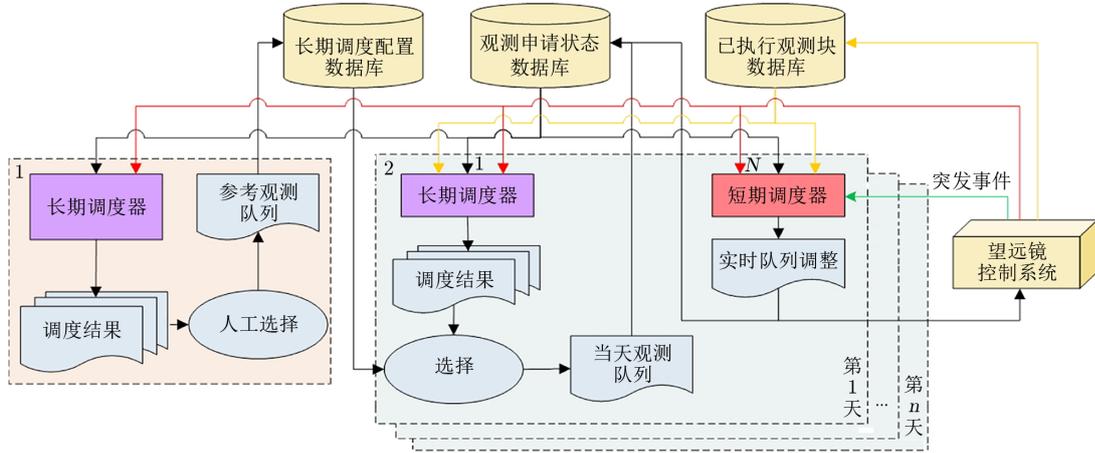


图 1 切连科夫望远镜阵列调度框架^[21]

3.2 动态调度策略

由于实际问题的复杂性，调度问题往往是一个需要重复的过程^[22]，望远镜观测调度也不例外。天文观测中动态约束的存在，使得望远镜的观测调度问题成为动态调度问题的一个变体，解决此类问题的方法是通过在线的调度策略来对外界动态变化因素进行响应^[12]。根据动态因素是否可预知的特性，可将其分为可预知与不可预知两类，针对其不同的特点制定相应的调度策略。

3.2.1 可预知动态调度

对于可预知的动态约束，只须按照既定的流程，在调度过程中将其当作已知约束进行正常的处理，考虑到其动态变化的特点，可采用实时调度的方法解决。实时调度本质上是时间间隔更小的短期调度，当调度周期小于动态约束的变化周期时，便可实现实时调度。环境因素作为可预知的动态约束，在下一个观测任务开始前，便可获知随后一段时间的环境状态信息，进而进行该时段观测目标的安排，实时监测并进行下一次调度。

3.2.2 不可预知动态调度

除实时性外，动态调度也应体现出其智能性，即能针对观测过程中的实际情况做出灵活的响应。对突发情况的应对措施便是动态调度智能化的体现，突发情况指在观测进行过程中，发生的不可预知的偶发性情况，如有价值的突发天象和设备的突发故障等。尤其是在时域天文领域，对超新星、 γ 暴等突发天象 (target of opportunity, ToO) 的研究，对调度系统能够及时调度相应望远镜进行 ToO 的后随观测甚至是协同观测提出迫切需求。

目前，国内外在针对 ToO 的望远镜调度策略上，已开展相关应用研究。英国利物浦望

远镜 (Liverpool Telescope, LT) 设置了一个不需要人为干涉的自动响应模式, 用来对触发的 γ 暴进行后随观测^[23]。其后随观测调度不与正常的调度操作交互, 由一个单独的代理软件程序触发自动控制系统的警报响应模块, 从而实现对 ToO 的观测, 并在 ToO 观测结束后继续常规任务的目标选择与观测。目前, 此类调度系统虽然能对特定 ToO 进行及时有效的响应, 但无法灵活应对其他情况, 处理内容仍比较单一, 还需进一步改进。

针对不可预知情况, 动态调度的关键在于对突发情况的智能化处理与决策, 调度系统可通过相应智能处理模块获得有效信息, 辅助其进行望远镜的调度。如望远镜智能诊断模块的构建, 可以监测望远镜自身及相关仪器设备的故障情况, 目前比较常见的有智能故障诊断专家系统, 已应用于一些望远镜上^[24-26], 可通过将各类故障对观测调度的影响程度进行分类, 实现其与相应的调度措施的对应。同样地, 针对 ToO 也可建立各自完备的处理机制, 通过将其分类、评级以及设置处理方法, 使调度系统能针对具体的情况, 采取有效的协同策略对 ToO 进行观测, 如调度一台望远镜进行测光观测, 或调度多台望远镜分别开展测光和光谱观测等。在突发情况处理结束后, 调度系统须回归常规观测, 避免造成观测时间的浪费。

3.3 闭环调度策略

为确保观测结果的数据质量, 像质评定模块结果可传回观测调度系统, 使调度过程形成闭环结构。科学目标经过调度、观测后, 其执行结果经像质评定, 若不能满足科学目标的观测要求, 则可将该目标源放入调度池中, 重新进行目标的调度与观测。

如图 2 所示, CFHT 也包含此像质评定模块以形成闭环调度。在其原本的队列服务观测模式 (queued service observing, QSO) 下, 由远程操作的人员 (remote observer, RO) 执行此项图像质量评定工作。由于工作量繁重且重复, 在其提出的自动调度观测模式 (automated scheduled observations, ASO) 下, CFHT 使用机器学习的方法训练了图像评定分类器, 实现图像的智能评定, 经测试具有较高的准确率^[27]。

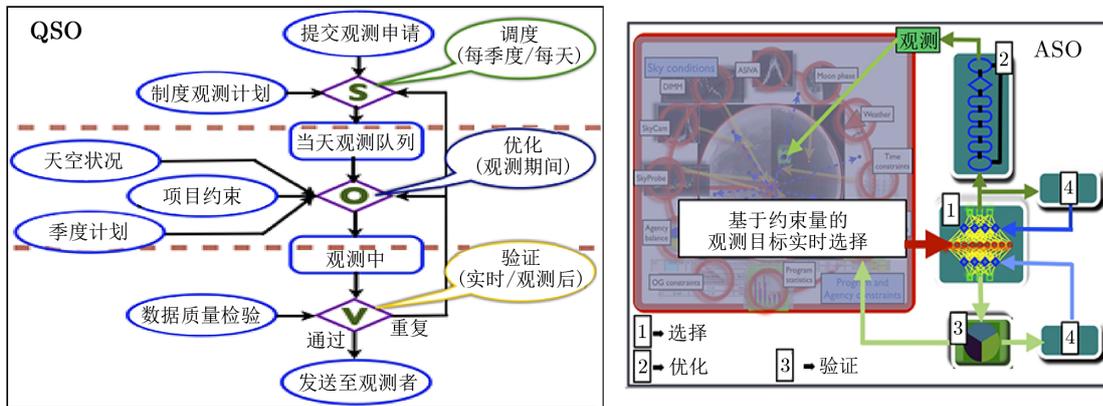


图 2 CFHT 调度系统升级对比图^[27]

4 观测调度系统的应用

早在 20 世纪 90 年代, 为了使投入巨大的哈勃太空望远镜能够有效地利用, Johnston 和 Miller^[11] 针对此开发了 SPIKE 调度系统, 随后许多望远镜也针对自身情况设计出各具特色的观测调度系统。纵观通用型地基光学望远镜用到的观测调度系统, 可将其主要应用简单归纳在以下两方面。

4.1 单望远镜观测调度系统

4.1.1 大口径望远镜

随着对灵敏度和分辨率的追求, 地基光学望远镜的口径越做越大, 它们往往具有复杂的控制系统和多样化的终端设备, 为世界天文学家所青睐, 其观测时间较为宝贵, 通过观测调度系统协助观测人员进行观测任务的协调, 尽可能地提高观测效率。

CFHT 是一台口径为 3.58 m 的光学/红外望远镜, 于 1979 年正式投入使用, 作为 Maunakea 天文台名列第三的主力望远镜设备, 2001 年 CFHT 开始尝试使用远程的 QSO 模式, 该模式包含科学计划提交、观测队列准备、观测执行与评价、项目进展更新四个步骤^[3]。在科学计划提交并由科学委员会评定后, 队列协调者会在每晚观测前准备多个针对不同天气条件的队列, 观测过程中远程观测助手会根据实时天气变化进行不同队列观测目标的切换, 每当一个目标观测结束, 远程观测助手会对其进行成像质量评估, 不满足要求的目标将会重新安排观测^[27]。CFHT 团队为该过程设计了相应的软件工具, 但仍需要人工操作以完成整个调度过程, 至 2011 年此模式的观测时间已达 95%^[9]。

人工智能作为望远镜由自动化走向自主化的关键要素, CFHT 团队 2012 年提出了一种 ASO 模式, 通过将人工智能算法引入到观测调度过程, 能够取代部分人力工作, 实现基于全局优化的队列观测目标的实时选择、基于机器学习的图像质量评估以及基于全天云图的光度条件判断^[27]。虽然该自动调度观测模式并未实际应用, 但提供了人工智能解决天文观测问题的新方法。2013 年随着其圆顶通风口的安装, CFHT 提出并应用了基于信噪比的队列服务观测 (SNR-QSO) 模式, 即以满所需信噪比为目标, 充分利用台址和圆顶通风所带来的优势, 节约观测曝光时间, 从而优化观测时间的利用率, 这也对动态观测调度提出需求, 目前该模式支持 MegaCam 和 ESPaDOnS 两个终端^[28, 29]。

4.1.2 小口径望远镜

观测调度系统也被用于系统级小口径望远镜的控制系统中, 由于其具备观测目标选取能力, 能够通过与其他系统的协调配合, 共同实现望远镜自主观测的目的。

FLWO (Fred Lawrence Whipple Observatory) 位于美国亚利桑那州, 隶属于史密松天体物理台 (Smithsonian Astrophysical Observatory, SAO), 其站内的 1.2 m 望远镜于 2010 年将 RTS2 (Remote Telescope System, 2nd version) 集成于望远镜相应控制软件^[30], 使其实现了自动观测。RTS2 是一套集成化开源程控自主天文台系统, 最早版本完成于 1999—2000 年, 后经数次版本升级, 主要基于 Linux 操作系统^[31]。RTS2 的设计目的是开发一套用于完全自主观测模式的望远镜观测控制系统, 观测调度模式主要为以下两种^[32]: 派遣调度和队

列调度。派遣调度是从所有目标源中实时选择价值最高的作为观测目标, 其优点是具有自驱动性, 是无人干预情况下自主观测系统的理想调度模式, 但其选择过于随机, 不利于整体观测规划; 队列调度是在观测者参与下, 按照提前准备的观测队列并结合当前状况, 选择合适队列进行观测^[31], 该模式能够展示观测任务且对用户友好, 但其灵活性较低。

在 FLWO 的 1.2 m 望远镜观测调度系统中, RTS2 采用了一种将队列调度与派遣调度相结合的方式对观测目标的选取^[33]。通过程序设置该系统能够根据不同的情况选择执行当晚的观测队列, 当队列出现空闲时, 通过计算目标源库中各观测目标的价值函数, 选择价值最高的目标源进行观测。在 ToO 出现时, 用户可以使用程序添加 ToO 至目标源数据库, 并通过设置高优先级和启动立刻执行指令, 使其在下一个目标中被观测, 若观测者不希望队列被打断, 也可以关闭 ToO 触发模块。经升级改造, 通过提前制定观测队列, 该望远镜已实现观测当晚的自动观测。如果希望手动操作, 也可以选择禁用自动观测功能^[33]。

4.2 望远镜联测网络观测调度系统

进入 21 世纪以来, 随着时域天文学的发展, 基于不同科学目标的程控自主天文台网络项目如雨后春笋般应运而生, 如 BOOTES (γ Burst Observer and Optical Transient Exploring System), MASTER (Mobile Astronomical System of TElescope-Robots), MONET (Monitoring Network of Telescopes), LCOGT (Las Cumbres Observatory Global Telescope) 等项目。为用于多望远镜联测场景, 望远镜观测调度系统除了进行常规观测协调外又被赋予新的功能, 即实现多台望远镜的统一调度, 完成协同观测和后随观测等任务。

LCOGT (Las Cumbres Observatory Global Telescope) 是一个致力于时域天文学的程控自主光学望远镜网络, 计划建成遍布于全球 8 个站点, 由约 50 余台望远镜组成的联测网络^[34], 其中望远镜口径涵盖 2 m, 1 m 以及 40 cm 三种类型, 同类型望远镜由相同的构架、终端仪器与滤光片组成^[35], 目前已建成的观测站点及望远镜信息如表 2 所示^①。

LCOGT 软件框架采用中心辐射式结构^[34], 即总控制中心位于 Santa Barbara 总部, 负责请求响应、望远镜调度、数据处理、文件归档等工作, 其他分节点则负责中心命令的执行与结果的反馈, 其软件体系结构功能框图如图 3 所示。其软件系统由用户交互层、数据层和控制层组成, 其中调度模块位于软件控制层, 由季度调度、月调度和自适应调度三个单元组成^[34]。在进行常规观测时, 季度调度单元能够计算出每个观测季、不同站点观测目标的大致观测时间; 月调度单元通过结合观测时间以及其他约束信息, 构建出下个月观测目标的详细计划; 自适应调度单元能够读取构建好的月计划, 通过进一步结合天气及设备情况信息构建观测当晚实时观测列表, 并交由各站点相应站点代理软件执行。一般情况下, 调度软件不会打断正在执行的观测任务, 但在出现对时间要求严格的 ToO 时, 自适应调度单元则会暂停当前任务而对 ToO 进行响应^[36]。

RoboNet-II 是利用遍布于全球的全自动望远镜网络进行微引力透镜事件探测的项目, 是在 RoboNet-I 试点项目上的延续, 目前该项目使用了 3 台 2 m 级望远镜, 分别是 LT (Liverpool Telescope), FTN (Faulkes Telescope North) 和 FTS (Faulkes Telescope South),

^①<https://lco.global/observatory/sites/>

表 2 LCOGT 已建设站点相关信息

站点名称	地理位置	海拔/m	时区	口径和数量
Siding Spring Observatory	S31°16'23"	1 116	UTC+10	1 × 2 m
	E149°04'15"			2 × 1 m
				2 × 0.4 m
South African Astronomical Observatory	S32°22'48"	1 460	UTC+2	3 × 1 m
	E20°48'36"			1 × 0.4 m
Teide Observatory	N28°18'00"	2 330	UTC	2 × 1 m (2020)
	W16°30'35"			2 × 0.4 m
Cerro Tololo Inter-American Observatory	S30°10'02"	2 198	UTC-3	3 × 1 m
	W70°48'17"			2 × 0.4 m
McDonald Observatory	N30°40'12"	2 070	UTC-6	1 × 1 m
	W104°01'12"			1 × 0.4 m
				1 × 1 m (2019)
Haleakala Observatory	N20°42'27"	3 055	UTC-10	1 × 2 m
	W156°15'21"			2 × 0.4 m
Wise Observatory	N30°35'45"	875	UTC+2	1 × 1 m
	E34°45'48"			
Ali Observatory	N32°19'	5 100	UTC+8	在建
	E80°01'			

后两者均隶属于 LCOGT^[37]。

每台望远镜的控制系统由以下四部分组成^[38]：自动控制系统 (robotic control system, RCS)，观测者支持系统 (observer support system, OSS)，望远镜控制系统 (telescope control system, TCS)，仪器控制系统 (instrument control system, ICS)。RCS 负责向 TCS 和 ICS 发送控制命令、接收观测环境信息并进行开始与结束观测的决策，其控制命令主要来自于 OSS 和突发天象控制系统 (Target of Opportunity control system, TOCS)。OSS 提供望远镜观测调度的功能，在常规观测进行时，OSS 采用 dispatch 方法进行观测目标选取，即根据当前望远镜状态、时间信息以及环境条件等，计算观测目标数据库每个目标源的观测价值，挑选数值最高的目标源作为下一个观测目标进行观测^[23]，正如前文提到的，这是一种忽略全局优化最大化而着重匹配当前条件的调度方法。TOCS 则能在外部触发 ToO 时，自动或手动配置并向 RCS 发送中断当前观测开启 ToO 观测的信息。望远镜网络的控制则由用户和望远镜代理实现，通过与各望远镜调度器通信，挖掘观测数据库与实时信息，从而指挥各望远镜观测^[39]。同时，各望远镜也具有相应数据处理流水线，能够对数据进行初步处理，以判断是否需要重新调度观测^[37]。

由于受到天文观测设备和观测模式的限制，我国目前在观测调度系统领域的研究与应用仍处于起步阶段，但通过积极参与国际合作，如以开展星震学研究为主要目标的 SONG (Stellar Oscillation Network Group) 项目^[40]，以及用于开展瞬变源和高能天象观测

的 BOOTES 项目^[41]等, 也对望远镜观测调度系统的研究有了一定的基础。通过前期研究工作积累与广泛调研, 我们团队将利用兴隆观测站观测设备进行望远镜智能控制相关内容的研究, 基于天文台的望远镜观测调度系统作为实现智能控制的关键一步, 相关的研究工作也将陆续开展。

5 总结与展望

望远镜观测调度系统作为智能化望远镜的中枢控制单元, 能够在天文观测中起到资源分配及调度决策的作用。目前, 经过国内外诸多研究实践, 望远镜调度问题的求解已相对成熟, 一些望远镜团队也通过设计观测调度流程、制定有效的观测调度策略, 构建观测调度系统相应的调度软件, 实现了无人参与的望远镜调度。这一方面节省了时间与人力, 另一方面也通过计算机算法, 确保调度结果的最优化, 对于提高天文望远镜时间利用率和观测效率具有重要意义。尤其随着时域天文学的发展, 天文学家对望远镜的灵活性以及即时响应性提出需求。大口径望远镜的观测时间宝贵且申请过程非常严格, 而与之相比, 中小口径望远镜的观测时间相对灵活且分布广泛, 便于开展后随观测和协同观测等, 因此中小口径望远镜在天文研究中拥有得天独厚的优势。所以, 能结合外部动态因素与自身特点的更具灵活性的动态调度系统, 以及针对多望远镜的观测调度系统拥有广泛的前景与发展空间。LCOGT 项目便在该方向进行了研究应用, 其遍布于全球的望远镜网络已被用于研究超新星、系外行星、小行星以及活动星系核等天体, 且在 2017 年通过后随观测, 在引力波的光学对应体以及发现一种连续爆炸的新型超新星这两个重大发现中发挥了关键作用^[42, 43]。随着计算机与人工智能技术的不断发展, 观测调度系统可以借助相应的智能化方法来不断地完善, 使其在决策调度的过程中具有更高的灵活性, 为望远镜朝向智能化发展奠定坚实基础。

致谢

感谢审稿人对本文提出的宝贵意见和建议, 感谢编辑部的真诚帮助。

参考文献:

- [1] 黄佑然, 许傲傲, 唐玉华, 等. 实测天体物理学. 北京: 科学出版社, 1987: 3
- [2] Silva D. Messenger, 2001, 105: 18
- [3] Martin P, Savalle R, Vermeulen T, et al. Observatory Operations to Optimize Scientific Return III. Montreal: SPIE, 2002: 4844
- [4] 葛亮. 博士论文, 北京: 中国科学院国家天文台, 2015: 7
- [5] 崔辰州, 李建, 蔡栩, 等. 天文学进展, 2013, 31: 141
- [6] 徐俊刚, 戴国忠, 王宏安. 计算机研究与发展, 2004, 41: 257
- [7] 李智勇, 黄滔, 陈少森, 等. 软件学报, 2017, 28: 1529
- [8] 尹树成. 硕士论文. 天津: 天津大学, 2017: 17
- [9] Manset N, Burdullis T, Devost D. Telescopes from Afar. Hawaii: SASS, 2011: 62

- [10] Mahoney W, Veillet C, Thanjavur K. *Observatory Operations: Strategies, Processes, and Systems IV*. Amsterdam: SPIE, 2012: 8448
- [11] Johnston M D, Miller G E. *ASI Conf Ser*, 1993, 52: 329
- [12] Mora M, Solar M. *Artificial Intelligence in Theory and Practice III*. Berlin: Springer, 2010: 331
- [13] 王勇, 蔡自兴, 周育人, 等. *软件学报*, 2009, 20: 11
- [14] 蔡海鸾. 硕士学位论文. 上海: 华东师范大学, 2015: 11
- [15] Solar M, Michelon P, Avarias J, et al. *Astron Comput*, 2015, 16: 90
- [16] Colome J, Colomer P, Guàrdia J, et al. *Observatory Operations: Strategies, Processes, and Systems IV*. Amsterdam: SPIE, 2012: 8448
- [17] 钟靖, 侯金良, 沈世银. *天文学进展*, 2013, 31: 442
- [18] 范舟, 赵刚, 王炜, 等. *天文学进展*, 2018, 36: 101
- [19] Morokuma T, Tominaga N, Tanaka M, et al. *PASJ*, 2014, 66: 114
- [20] Castro-Tirado A J. *ADV ASTRON*, 2014, 2010: 1687
- [21] Colomé J, Colomer P, Campreciós J, et al. *Observatory Operations: Strategies, Processes, and Systems V*. Montreal: SPIE, 2014: 9149
- [22] 蔡兰, 郭顺生. *科技进步与对策*, 2004, 21: 170
- [23] Smith R J, Clay Neil R, Fraser Stephen N, et al. *Observatory Operations: Strategies, Processes, and Systems III*. San Diego: SPIE, 2010: 7737
- [24] Landau R. *PASA*, 1994, 11: 180
- [25] Liu J, Luo M C, Tang P, et al. *Observatory Operations: Strategies, Processes, and Systems V*. Montreal: SPIE, 2014: 9149
- [26] 付夏楠, 黄垒, 魏建彦. *天文研究与技术*, 2016, 13: 366
- [27] Mahoney W, Thanjavur K. *Telescopes from Afar*. Hawaii: SASS, 2011: 38
- [28] Devost D, Moutou C, Manset N, et al. *Observatory Operations: Strategies, Processes, and Systems VI*. Edinburgh: SPIE, 2016: 9910
- [29] Devost D, Mahoney B, Manset N, et al. *Observatory Operations: Strategies, Processes, and Systems VII*. Austin: SPIE, 2018: 10704
- [30] <http://www.sao.arizona.edu/FLWO/48/robot-history.html>, 2019
- [31] Kubánek P, Jelínek M, Vítek S, et al. *Advanced Software and Control for Astronomy*. Orlando: SPIE, 2006: 6274
- [32] Kubánek P. *ADV ASTRON*, 2010, 2010: 902484
- [33] Kubánek P, Falco E, Jelínek M, et al. *Observatory Operations: Strategies, Processes, and Systems IV*. Amsterdam: SPIE, 2012: 8448
- [34] Hawkins E, Baliber N, Bowman M, et al. *Observatory Operations: Strategies, Processes, and Systems III*. San Diego: SPIE, 2010: 7737
- [35] Pickles A, Hjelstrom A, Boroson T, et al. *Observatory Operations: Strategies, Processes, and Systems V*. Montreal: SPIE, 2014: 9149
- [36] Saunders E S. *Observatory Operations: Strategies, Processes, and Systems V*. Montreal: SPIE, 2014: 9149
- [37] Tsapras Y, Street R, Horne K, et al. *Astronomische Nachrichten*, 2010, 330: 4
- [38] Fraser S, Steele I A. *Optimizing Scientific Return for Astronomy through Information Technologies*. Glasgow: SPIE, 2004: 5493
- [39] Allan A, Naylor T, Saunders E S. et al. *Astronomische Nachrichten*, 2010, 327(8): 767
- [40] Deng L, Xin Y, Zhang X, et al. *Astrophysics from Antarctica*, 2013, 288: 318
- [41] Castro-Tirado A J, Jelínek M, Gorosabel J, et al. *ASI Conf Ser*, 2012, 7: 313
- [42] Arcavi I, Hosseinzadeh G, Howell D A, et al. *Nature*, 2017, 511: 64
- [43] Arcavi I, Howell D A, Kasen D, et al. *Nature*, 2017, 511: 210

Research Progress on Observation Scheduling System of Telescope

LI Man-di^{1,2}, GE Liang¹, JIANG Xiao-jun^{1,2}

(1. Key Laboratory of Optical Astronomy, National Astronomical Observatories, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100012, China; 2. School of Astronomy and Space Science, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: The observation scheduling system of telescopes, which plays the role of the coordinator of an observatory, is mainly responsible for scheduling the observation plans of observers rationally, making the best of observational resources. Although the scheduling process is very complicated, the artificial intelligence algorithms work well on solving such problems. Both domestic and foreign teams have done a lot of related researches, and also have applied their algorithms to corresponding telescopes. In this paper, we introduce the solution to the telescope scheduling problem and the scheduling strategies commonly used for universal telescopes. The application of observation scheduling systems on different telescopes is also reviewed and discussed. With the development of artificial intelligence, the observation scheduling system will help to further improve the observational efficiency and data quality, better serving the astronomical observation.

Key words: astronomical telescope; observation scheduling; artificial intelligence